

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

# **3D skenování, kontrola a měření součástí po výrobě 3D tiskem**

3D Scanning, Control and Measurement  
of Parts after 3D Printing

Student:

Jan Jansa

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Jansa**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: 3D skenování, kontrola a měření součástí po výrobě 3D tiskem  
3D Scanning, Control and Measurement of Parts after 3D Printing

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Poznání současného stavu.
3. Návrh měření, úprava a porovnání naskenovaných dat s CAD modelem.
4. Zhodnocení měření.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

3D skenování [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz>.

GIBSON, I; D. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010, 459 p. ISBN 1441911200.

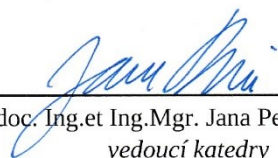
TIŠNOVSKÝ, PAVEL. *Bezkontaktní digitalizace předmětů pomocí 3D scanneru Minolta Vivid VI-700*. Elektrorevue, 2003, s. 1-25, ISSN 1213-1539.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

  
doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petřů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

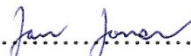
V Ostravě dne 21. 5. 2018

.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB – TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. 5. 2018

..........

Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Jan Jansa

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Dolní Čermná 7, 561 53

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

JANSA, J. *3D skenování, kontrola a měření součástí po výrobě 3D tiskem: Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2018, 44 s. Vedoucí práce: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá laserovým 3D skenováním a jeho konkrétní aplikací. V úvodní části jsou vysvětleny principy skenování a s ním související pojmy. Následuje obecné rozdělení skenerů dle využívané technologie skenování. V další části se práce věnuje měření konkrétního prototypu, následně úpravě a zpracování dat získaných 3D skenerem. V poslední části se nachází vyhodnocení nasnímaných dat na základě stanovené tolerance a porovnání prototypu vytištěného na 3D tiskárně se vzorovým CAD modelem.

## ANNOTATION OF BACHLEOR THESIS

JANSA, J. *3D Scanning, Control and Measurement of Parts after 3D Printing: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2018, 44 p. Thesis head: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Bachelor thesis deals with 3D laser scanning and its application. The introduction part explains basic principles of scanning and involved terms. Next part describes general distribution of scanners by the technology of scanning. Third part of thesis deals with measurement of 3D printed prototype, adjustment and elaboration of data. Last part contains evaluation and comparison of scanned data with CAD model.

## Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	7
Úvod.....	8
1 Skenování objektů ve 3D .....	9
1.1 Triangulace.....	9
1.1.1 Historie získávání dat o souřadnicích bodů .....	10
1.1.2 Metody získávání dat .....	11
1.2 Koncepce reverzního inženýrství.....	13
1.3 Digitalizace fyzického objektu.....	14
1.3.1 Výstupní data ze 3D skenerů.....	14
1.3.2 Zpracování dat.....	16
1.4 Rozdělení 3D skenerů .....	19
1.4.1 Dotykové skenery CMM.....	19
1.4.2 Laserové bezkontaktní skenery .....	20
1.4.3 Optické skenery.....	21
2 Měření, úprava dat a technologie výroby prototypu .....	23
2.1 3D tisk .....	23
2.1.1 Technologie SLS .....	23
2.1.2 Zařízení EOS P396.....	26
2.2 HandySCAN 700™ .....	26
3 Reverzní inženýrství prototypu .....	29
4 Porovnání naměřeného prototypu s CAD daty .....	37
Zhodnocení, závěr .....	40
Seznam použitých zdrojů .....	43

## Seznam použitých symbolů a zkratk

<b>Značení:</b>	<b>Vyjádření:</b>
3D	třírozměrný (3 Dimensional)
CAD	počítačem podporovaný design (Computer aided design)
CCD	zařízení s vázanými náboji (Charge-coupled device)
CMM	souřadnicový měřicí přístroj (Coordinat-measuring machine)
CMOS	způsob vytváření logických členů (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)
CT	výpočetní tomografie (Computed Tomography)
FDM	modelování nanášením taveniny (Fused Deposition Modeling)
NURBS	matematický model používaný v grafice pro generování křivek (Non-Uniform Rational Basis Spline)
SLS	selektivní laserové spékání (Selective Laser Sintering)
STL	stereolitografie (Stereolitography)
ToF	délka doby letu (Time Of Flight)

## Úvod

Aditivní technologie neboli 3D tisk zažívá v posledních letech velký rozvoj. Možnosti a pestrá škála využití neustále narůstají, ať už v leteckém průmyslu, lékařství (rekonstrukce obličejů, tisk implantátů) nebo automobilovém průmyslu. Výhodou 3D tisku je již v dnešní době poměrně dobrá cenová dostupnost a zefektivnění výroby prototypů, případně snižování nákladů na výrobu. S rozvojem materiálů a typů jednotlivých technologií 3D tisku, ať už plastů nebo kovu, je potřeba rozvíjet i metody, jimiž jsou výrobky zhotovené aditivní technologií kontrolovány a měřeny.

Vzhledem k tomu, že se většinou jedná o objekty se složitou strukturou povrchu, binomické konstrukce nepravidelných tvarů nebo součástí s vnitřní složitou konstrukcí a podobně, nelze takto náročné povrchy efektivně měřit běžnými konvenčními metodami, které jsou ve strojírenství používány. Tvary dílů vyžadují specializované technologie jako je například optické skenování, CT skenování nebo laserové 3D skenování, pomocí nichž lze složité tvary dílů měřit a ověřovat správnost rozměrů.

Téma 3D skenování jsem si vybral z důvodu svého zájmu o využívání moderních technologií ve strojním průmyslu. Dle mého názoru je aditivní technologie perspektivní odvětví strojírenství. Stejně jako techniky s ní související.

Tato práce se zabývá laserovým 3D skenováním a jeho využitím v procesu reverzního inženýrství. Laserové skenování svým principem nabízí časově poměrně nenáročnou, a v dnešní době již dostatečně přesnou technologii pro rychlé získání digitálního modelu objektu se složitou geometrií povrchu.

Cílem práce bylo popsat základní techniky, které jsou využívány v oblastech snímání obrazu a s nimi související slovní spojení jako například reverzní inženýrství, triangulace a digitalizace povrchu, zabývající se převodem fyzických tvarů a povrchů do digitální podoby. V dalších kapitolách se práce věnuje konkrétní aplikaci, a sice zpětné kontrole prototypu vytištěného na 3D tiskárně technologií SLS, o které práce také obecně pojednává.

Hlavním cílem tedy bylo využití laserového 3D skeneru k verifikaci rozměrů vytištěného prototypu, vyhodnocení případné odchylky rozměrů od původního modelu a návrh řešení v případě nepříznivých výsledků získaných porovnáním.



# 1 Skenování objektů ve 3D

3D skenování se v současné době rozvíjí a dostává čím dál více do povědomí kvalifikovaných pracovníků na pozici konstruktérů nebo personálu pracujícího na kontrole. Svým principem technologie poskytuje možnost provádět práce a měření, kterých běžnými metodami a technologiemi nelze dosáhnout, jsou pro společnost finančně nákladné nebo časově náročné. Tato technologie se začíná používat ve větší míře než v minulých letech, a to právě díky časové úspoře a následné rychlejší realizaci projektů. S využitím mobilních skenerů se dají v současné době skenovat objekty vyrobené z odlišných materiálů, všech různých tvarů a velikostí. <sup>1</sup>

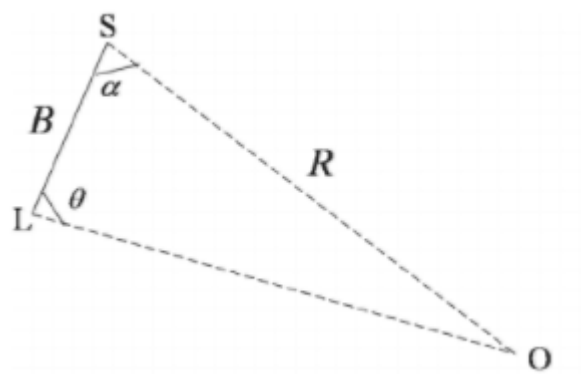
V souvislosti se 3D skenováním jsou často skloňovány pojmy jako triangulace nebo reverzní inženýrství, kterým se práce věnuje v následujících kapitolách.

## 1.1 Triangulace

Laserová triangulace je stereoskopická technika, při níž je vzdálenost předmětu vypočítávána za pomoci rozkmitaného laserového paprsku, či paprsků a kamer. Rozkmitaná laserová matrice je promítána na povrch skenovaného objektu, kde je snímána kamerami. Kamery zaznamenávají průřez laseru na povrch a digitalizují všechny body z laserové čáry, či matrice. <sup>9</sup>

Při této metodě jsou využívány známé úhly a délka základní čáry mezi zdrojem světla a kamerou k výpočtu vzdálenosti bodu ležícího na objektu. Zdroj vysoce intenzivního světla (laser), je soustředěn a promítán pod specifickým úhlem na povrch předmětu. Fotosenzitivní zařízení, obvykle videokamera, zaznamenává odraz od snímaného povrchu a následně je s využitím geometrické triangulace spočtena pozice bodu povrchu ve vztahu k referenční rovině nebo značce. <sup>11</sup>

Na obrázku 1.1 je znázorněna triangulační geometrie s body S a L reprezentujícími kamerový senzor a projektor laserového paprsku, respektive rozsah základní přímky B, mezi těmito body a orientační úhly se známou velikostí. Vzdálenost R k bodu na povrchu objektu O, je počítána na základě předešlých známých hodnot.



**Obrázek 1.1 – Triangulační geometrie <sup>11</sup>**

S přímým paprskem světla vede tato triangulační geometrie k výpočtu vzdálenosti jednoho bodu na skenovaném povrchu. Pokud je paprskem hýbáno po předmětu, jsou získávány další body povrchu. Laser promítá pod specifickým úhlem a CCD kamera zaznamenává pixelové lokace průsečíku paprsku s objektem. Takto získaná pixelová lokace je pod specifickým úhlem vůči základní přímkce mezi laserem a CCD senzorem. Tehdy vede triangulace k získání prostorového měření.

Nevýhodou bodového laseru je, že CCD kamera musí zachytit jeden snímek pro každý změřený prostorový bod. Efektivnější způsob je snímání povrchu pomocí laserové linie namísto bodu. Zdroj světla v tomto případě promítá rovinu, jejímž řezem v prostoru v momentu setkání se skenovaným objektem je jednoduchá linie na povrchu předmětu. Tento systém umožňuje zvýšení rychlosti skenování, a proto je mnohem běžnější a používanější. <sup>11</sup>

### **1.1.1 Historie získávání dat o souřadnicích bodů**

Nejfrekventovanější metody získávání dat o souřadnicích bodů jsou triangulační metody v oblasti viditelných elektromagnetických vln. Počátky metod sahají až do starověkého Egypta a Babylonie, kdy již tehdejší obyvatelé používali tyto techniky. Později ve starověkém Řecku položili Euklid a Archimédes první matematické základy trigonometrie. Spousta dalších světoznámých vědců v průběhu následujících staletí, jako například Tycho de Brahe, se zabývali problémem triangulace.

Vědní disciplína fotogrammetrie je soubor metod k získání tvarů, měření rozměrů a určování polohy individuálních objektů zachycených analogovým nebo digitálním obrazem, fotografií. Vynález fotografie představil nový způsob zachycování okolního světa

a archivace. Pojmenovaný po svém vynálezci Louisi Daguerreovi, byla daguerrotypie první veřejně a prakticky užívaný komplexní fotografický proces (1839). Aktivní fotogrammetrie byla implementována do průmyslové praxe až o 150 let později na konci dvacátého století s příchodem digitální fotografie a rozvojem výpočetní techniky.

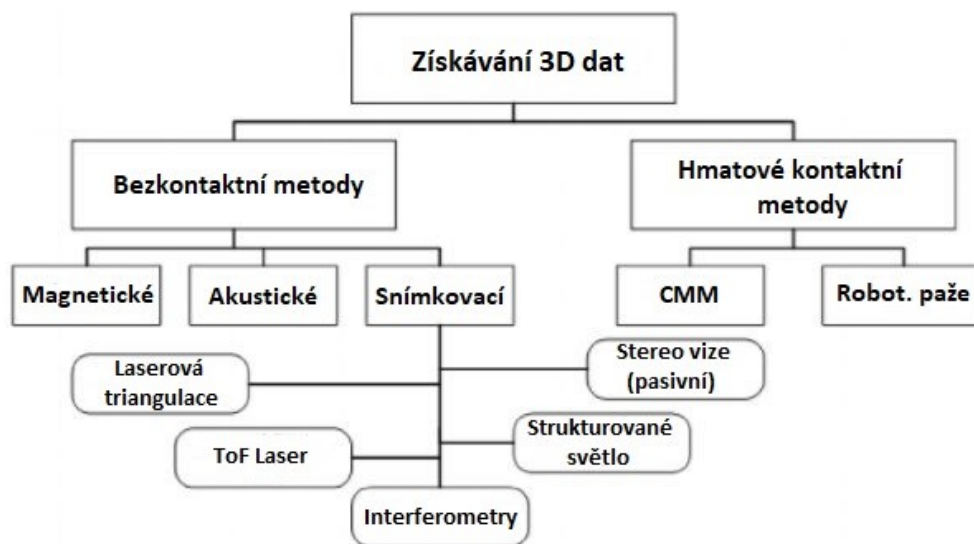
Praktické 3D skenery založené na principu aktivní triangulace a schopné snímat 3D povrch součástí s dostatečným rozlišením byly představeny zhruba před třiceti lety. Vývoj těchto technologií se úzce pojil s vývojem výpočetní techniky, a především zvýšení výpočetního výkonu počítačů umožnilo realistické vykreslení 3D obrazů.

Existuje několik technik získávání dat o souřadnicích bodů, které jsou schopny digitalizovat jak vnější, tak vnitřní geometrii objektů. Ty zahrnují i počítačovou tomografii (CT), zpočátku užívanou pouze v oblasti medicíny a nyní již využívanou také ve strojním odvětví.

Mimo výše zmíněné bezkontaktní metody získávání dat o souřadnicích bodů jsou v průmyslu velmi často používány i kontaktní metody. První souřadnicový stroj byl představen v roce 1951 firmou Ferranti. Je nezbytné podotknout, že kontaktní metody měření a skenování tvarů jsou aplikovány již několik dekad a jsou zahrnuty v každodenních činnostech výrobního procesu, i přes dnešní možnosti v oblastech CAD systémů.<sup>10</sup>

### **1.1.2 Metody získávání dat**

V dnešní době existuje velké množství metod měření tvarů objektů. Liší se především funkcí, stejně jako velikostí dosažené přesnosti měření a pracovní vzdálenosti od měřeného objektu. Měření rozměrů ve strojírenství náleží ke skupině nazývané strojní metrologie a průmyslová fotogrammetrie. Následující obrázek klasifikuje bezkontaktní a kontaktní metody získávání dat o souřadnicích bodů. Důraz je kladen především na techniky založené na snímkování, laserovou triangulaci a kódovanou světelnou matici - strukturované světlo.



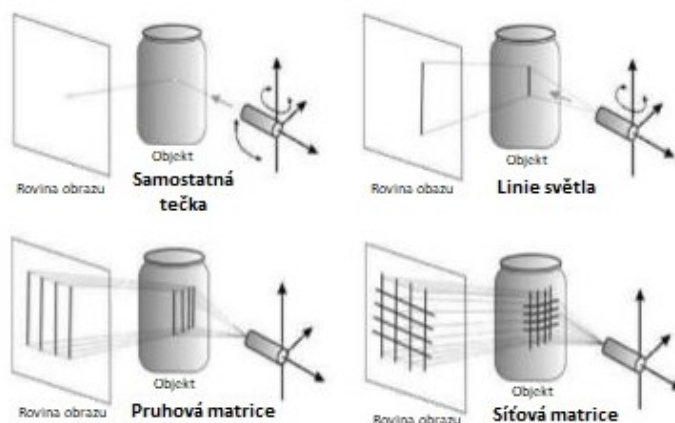
**Obrázek 1.2 – Klasifikace metod pro získávání 3D dat <sup>11</sup>**

Jsou-li používány kontaktní metody k získání informací o souřadnicích bodů na povrchu součásti, je objekt měřen mechanickou sondou za přítomnosti fyzického kontaktu mezi měřicí sondou a reálným objektem. <sup>10</sup>

Takovéto mechanické sondy jsou součástí strojového měření souřadnic CMM (Coordinate Measurement Machine), které zachycuje prostorové body měřených povrchů. CMM jsou vyspělé a zavedené technologie v nynějším výrobním procesu a obvykle užívají právě dotekových sond, které jsou navigovány kolem povrchu předmětu po naprogramovaných drahách a sbírají data o měření jednotlivých bodů. Další nevýhodou jsou technické parametry sondy omezující rychlost skenování a sběru dat. Oproti bezkontaktním metodám vyžadují techniky CMM fyzický dotyk měřící sondy nebo alespoň přiblížení do těsné blízkosti k povrchu objektu, který je měřen. Tento fyzický dotyk není obvykle hlavním problémem, ale neopatrné zacházení se sondou může poškodit měřený předmět. Bezdotykové metody založené na snímkování naopak nabízejí potenciál v rychlejší sběru dat. Oproti CMM technikám mají však sníženou přesnost měření. Ale s rozvojem polovodičové technologie se přesnost bezkontaktních skenerů zlepšuje. <sup>11</sup>

Nekontaktní metody využívají mechanické vlny, magnetická pole nebo elektromagnetické vlny k získání potřebných dat, a proto nepotřebují žádný fyzický kontakt mezi předmětem, který je měřen, a měřícím zařízením.

Při použití měření například pomocí strukturovaného světla jsou souřadnice bodů povrchu objektu získány projekcí a souběžným skenováním obrazce na povrchu předmětu. Taková měřicí metoda je rovněž nazývána aktivní triangulací. Na snímáný povrch mohou být promítány následující obrazce uvedené na obrázku 1.2. <sup>10</sup>



**Obrázek 1.3 – Rozdílné vzory promítané na snímáný předmět při užití metody strukturovaného světla <sup>12</sup>**

Metody aktivní triangulace jsou schopny získávat požadovaná data v poměrně krátkém časovém rozmezí. Přesnost měření je z největší části determinována rozlišením CCD senzoru a vzdáleností mezi měřeným povrchem a senzorem. Přesnost měření současně závisí i na optických materiálových vlastnostech skenovaného předmětu.

Techniky pasivní triangulace, včetně rozdílných forem fotogrammetrie, fungují na principu determinace dat o souřadnicích bodů za pomoci překrývajících se obrázků získaných pomocí jedné nebo více kamer, skenováním důležitých bodů měřeného objektu z různých úhlů. Dříve používané analogové kamery nahradily kamery novější se speciálními senzory CCD nebo CMOS. Termín „pasivní“ ve slovním spojení „pasivní triangulace“ znamená, že na rozdíl od aktivní triangulace není povrch snímán za pomoci aktivního zdroje světla. <sup>10</sup>

## 1.2 Koncepce reverzního inženýrství

Pojem reverzní inženýrství je v dnešní době stále používanějším slovním spojením v mnohých odvětvích výrobního průmyslu souvisejícím s příchodem nových technologií a zaváděním inovativních řešení do provozu podniků.

Význam spojení reverzní inženýrství je následující: „Proces zjišťování technologických aspektů zařízení, objektu nebo systému prostřednictvím analýzy jeho struktury, funkčnosti a provozu. Ve 3D skenování proces reverzního inženýrství zahrnuje sken objektu

*a následnou rekonstrukci jeho tvaru ve specializovaných programech do podoby 3D modelu.“<sup>2</sup>*

Principem metody je tedy získání trojrozměrného digitálního obrazu povrchu jakéhokoliv reálného předmětu a na základě nasnímaných dat vytvoření 3D CAD modelu pro výrobu nové součásti, analýza povrchu a rozměrů, či design. Snímáním a následující digitalizací získaná data mohou být dále upravena na plošné nebo objemové CAD modely, se kterými lze pracovat v různorodých CAD systémech.<sup>1</sup>

### **1.3 Digitalizace fyzického objektu**

Digitalizace, která je rovněž v některých případech nazývána trojrozměrná numerizace, poskytuje řadu možností využití, mezi které patří výroba prototypů, numerická rekonstrukce reálného objektu ve 3D nebo například inspekce a kontrola povrchu součástí.<sup>3</sup>

Data jsou získávána snímáním souřadnic bodů ležících na povrchu předmětu v prostoru, které se v reálném čase zobrazují na obrazovce počítače. Jednotlivé body jsou skenovány za pomoci snímacích systémů komunikujících s trojrozměrným měřicím strojem, mobilním měřicím zařízením nebo obráběcími stroji.<sup>3</sup>

Získaná data se mohou lišit svým obsahem a typem v závislosti na jejich dalším použití. Zejména se jedná o následné zpracování dat, které má vliv na konkrétní podobu získaných informací. Jde především o využití pro 3D tisk, reverzní inženýrství a další možnosti.

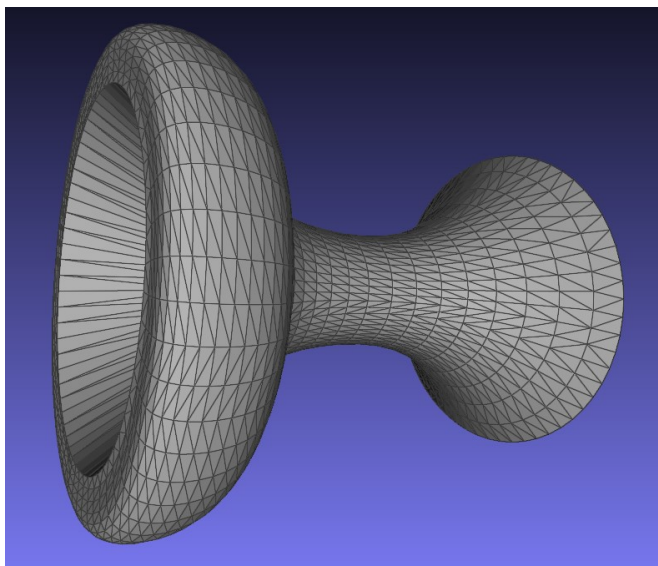
#### **1.3.1 Výstupní data ze 3D skenerů**

3D skener získává informace o snímaném předmětu ve třech dimenzích. Typ dat na výstupu ze skeneru je zásadní pro další zpracování v aplikacích. Každý ze skenerů má dopředu stanovený formát výstupních dat sloužících k exportu.<sup>2</sup>

K nejčastěji používaným exportovaným datům jsou řazeny:<sup>2</sup>

- přípona \*.STL (STereoLithography),
- přípona \*.OBJ,
- mračno bodů, přípony \*.dxf, \*.igs, \*.asc, \*.vtx, \*.wrl.

**Přípona \*.STL** je typem, kdy jsou data tvořena trojúhelníkovou sítí, která tvoří model povrchu. Většina CAD systémů dokáže informace tohoto typu načíst pouze jako grafiku, avšak některé programy umějí data zpracovat do podoby ploch, které se dají načíst v CAD softwarech. STL data vyjadřují nejjednodušší způsob vykreslení tvaru povrchu a jsou užívána k tisku na 3D tiskárnách. Struktura trojúhelníkové sítě je uvedena na obrázku 1.4. <sup>2</sup>



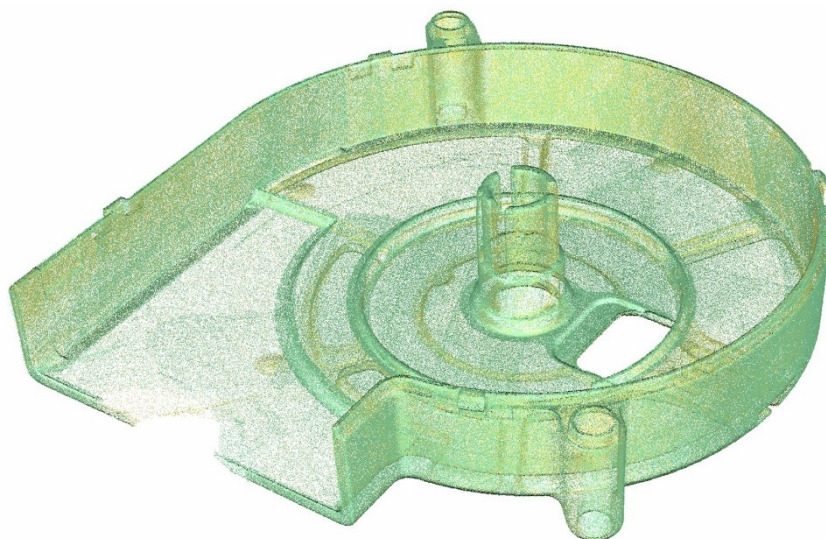
**Obrázek 1.4 – Trojúhelníková síť - přípona STL <sup>4</sup>**

**Přípona \*.OBJ** je druhem dat tvořených stejným způsobem jako u přípony STL do podoby trojúhelníkové sítě. Oproti předchozímu typu obsahují data navíc texturu povrchu předmětu, která je formována snímky pořízenými během procesu skenování. <sup>2</sup>



**Obrázek 1.5 – Trojúhelníková síť s texturou skenovaného předmětu - přípona OBJ <sup>2</sup>**

**Mračno bodů** (\*.dxf, \*.igs, \*.asc, \*.vtx, \*.wrl) definuje povrch skenovaného objektu za pomoci jednotlivých bodů, z nichž každý má své vlastní souřadnice v prostoru na osách x, y, z. Body nejsou ničím spojené a mohou udávat jako přídavnou veličinu informaci o barvě bodu a směru své normály. Pro vizuální práci je mračno bodů obtížnější než předešlé výstupy dat, jelikož povrch není ztvárněn plošně a viditelnost všech bodů může být matoucí. Tato výstupní data jsou užívána hlavně u skenerů snímajících větší oblast ve svém okolí. <sup>2</sup>



**Obrázek 1.6 – Mračnem bodů nasnímaná součást <sup>5</sup>**

### **1.3.2 Zpracování dat**

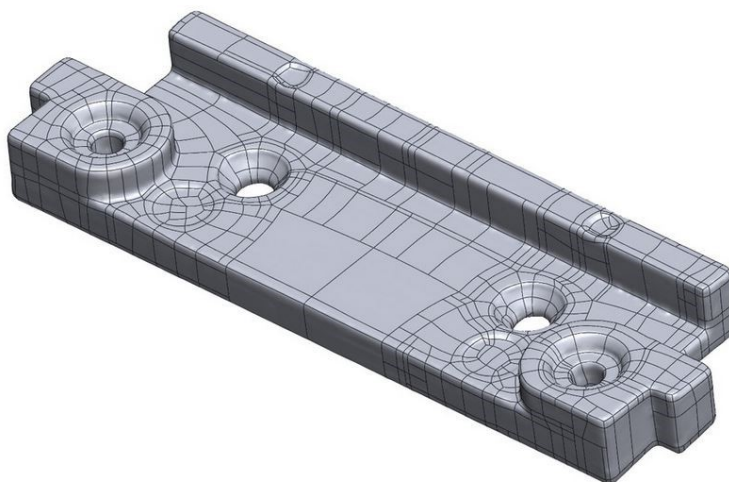
Po získání dat skenováním je na základě dalšího využití potřeba data zpracovat. Aby byly informace využitelné v dalších procesech, musí se přepracovat do požadovaného formátu, či podoby. Předchozí kapitola obsahovala druhy naskenovaných dat, která jsou využívána k dalším postupům popsaným níže. <sup>2</sup>

#### **Možnosti využití získaných dat: <sup>2</sup>**

- reverzní inženýrství,
- automaticky generované plochy (NURBS plochy),
- ruční modelování,
- porovnání naskenovaného modelu s jiným skenem, či CAD modelem,
- využití pro 3D tisk.



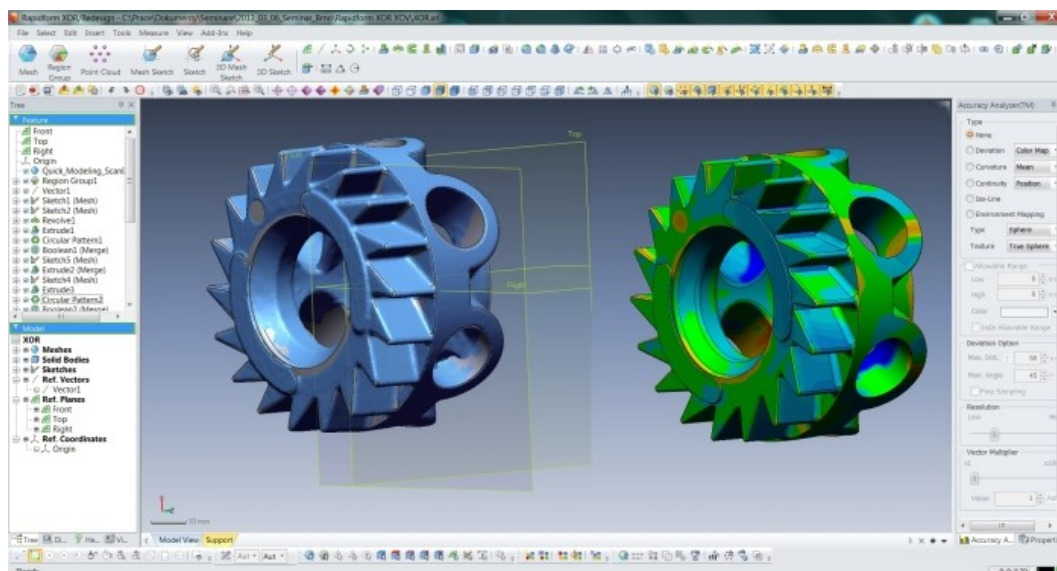
**V případě použití automaticky generovaných ploch** software po zásahu uživatele nebo sám vygeneruje na povrchu naskenovaných dat polygonové síť čtyřboké plochy reprezentující celý tvar modelu a utváří objemový model v případě, že je polygonální síť ucelená. Jednoznačnou výhodou tohoto výstupu je rychlost zpracování. Navazující úprava modelu nemusí být snadná, což je značnou nevýhodou automaticky generovaných ploch. Tento postup se využívá v případě, že je model nahrán do CAD aplikace a v dalším kroku obráběn nebo použit jako vzor pro konstrukce. <sup>2</sup>



**Obrázek 1.7 – Vygenerované plochy NURBS <sup>6</sup>**

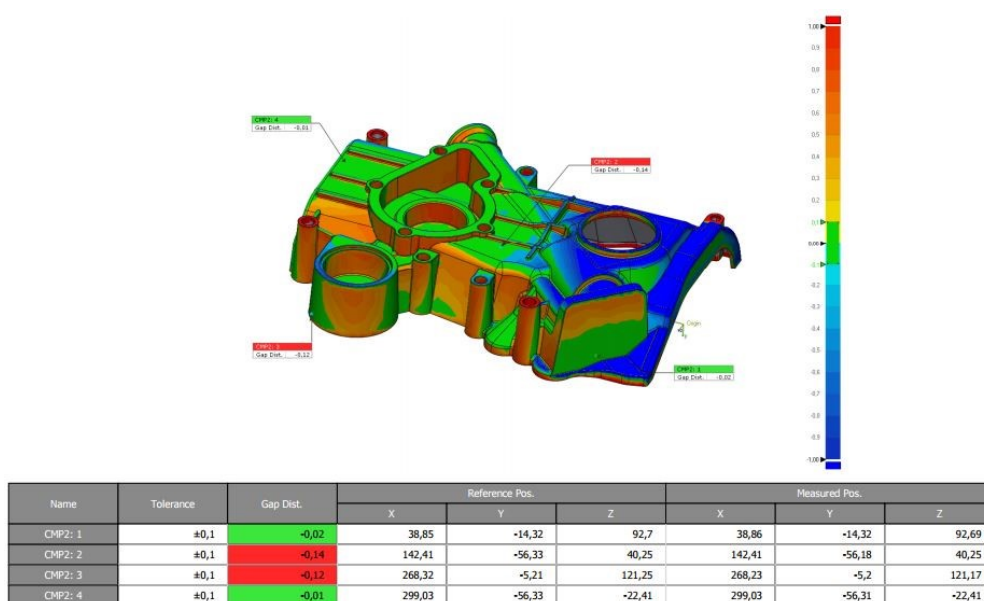
**U ručního modelování** je využito naskenované tělo předmětu jako vzor pro vymodelování parametrického modelu. Tento typ modelu je konstruován ručně za pomoci skic, rovin, řezů, vysunutí, rotace a dalších funkcí CAD systémů. S přítomností naskenovaných dat je nepřetržitě srovnávána modelovaná součást, s možností kontroly velikosti a odchylek od naskenovaných rozměrů. <sup>7</sup>

Metoda současně umožňuje přenést celou historii - tedy strom změn, v postupu modelování, což umožňuje s modelem dále pracovat a měnit ho dle potřeby, aniž by musel být tvořen nový model. Nevýhodou postupu je časová náročnost oproti tvoření modelu za pomoci automaticky generovaných ploch NURBS, s čímž souvisí i větší finanční náročnost. <sup>2</sup>



Obrázek 1.8 – Praktické využití nasnímaných dat k ručnímu modelování <sup>2</sup>

Kontrola vůči jinému skenu nebo CAD datům je dalším zpracováním v rámci reverzního inženýrství. Nasnímané informace lze rychle srovnat s hotovým CAD modelem. Díky tomu jsou zjištěny odchylky vznikající při výrobě předmětu a umožněna zpětná kontrola skutečnosti, že byl díl vyroben v rámci předepsaných tolerancí. Lze také zkoumat opotřebení dílů v průběhu jejich používání. Takto se dá příkladem porovnávat sken vůči skenu, měřit tvar pouze na základě jednoho skenu, srovnávat CAD model se skenem nebo sériově měřit díly pomocí robotického řešení. Výsledkem práce je inspekční zpráva popisující všechny kroky, které uživatel provedl při verifikaci rozměrů součásti. <sup>2</sup>



Obrázek 1.9 – Ukázka části inspekční zprávy <sup>8</sup>

**I využití pro 3D tisk** je možností zpracování dat po 3D skenování, jelikož majorita 3D tiskáren využívá zdrojová data v podobě formátu STL, které mohou být výstupem ze skeneru. Informace jsou uzpůsobeny k převedení do 3D tiskárny a okamžitému tisku kopie nasnímaného modelu.

## **1.4 Rozdělení 3D skenerů**

Existuje velké množství zařízení, která se v dnešní době prodávají na trhu. Tyto přístroje jsou schopny nasnímat a převést fyzické objekty do digitální podoby, 3D modelu. Liší se především použitou technologií a účelem, ke kterému slouží.

Je tedy nezbytné zvážit tyto skutečnosti: <sup>2</sup>

- účel využití naskenovaných dat (reverzní inženýrství, kontrola, 3D tisk, podklad pro další modelování designu, ...),
- velikost skenovaného objemu (každý skener má předem stanovené rozmezí, ve kterém je schopen skenovat, překročení rozmezí znamená snížení přesnosti),
- skenování bez textury nebo s texturou (s barvami objektu nebo bez barev),
- místo a prostředí skenování (venkovní - mimo budovu, laboratoř, na dílně, extrémní podmínky, ...),
- potřebný čas k nasnímání objektu (příkladem skenování části lidského těla nebo těla jako celku, je nutné celý objekt nasnímat v řádu několika sekund, protože se podoba těla oproti tuhému předmětu může během chvilky změnit),
- typ softwaru zpracovávající data (většina CAD systémů nedokáže pracovat s daty typu STL, OBJ, WRL, ...).

Na základě předešlých informací vymezí zkušený odborník optimální řešení pro požadovanou aplikaci.

### **1.4.1 Dotykové skenery CMM**

Jsou vhodné pro kontrolu geometrií součástí a jejich geometrických prvků. S využitím těchto přístrojů lze bodově kontrolovat tvary se složitým povrchem. Nezachycují však tvar celého objektu a pracovník obsluhující skener proměřuje pouze určitá místa povrchu. <sup>2</sup>

Před skenováním je doporučeno vyznačit na povrchu skenované součásti body, které je nezbytné nasnímat, aby byl získán přesný digitální obraz. Počet takovýchto bodů závisí na vyžadované přesnosti a složitosti povrchu objektu. Dotykové skenování lze provádět na stroji, který se zakládá na principu frézky s inverzním tokem dat. V zařízení je upnuta, namísto obráběcího nástroje, snímací sonda. Sonda se ocitá v určitém okamžiku v přímém kontaktu se skenovanou plochou a pomocí elektroniky je převáděna její poloha a data do CAD softwaru. Pro větší objemy dat je ale vhodnější užití specifického přístroje speciálně určeného pouze pro digitalizaci.<sup>3</sup>



**Obrázek 1.10 – CMM skener<sup>13</sup>**

#### **1.4.2 Laserové bezkontaktní skenery**

Ideální zařízení pro komplexní kontrolu součástí, v dnešní době již s vysokou přesností. Skenery jsou schopny snímat celé tvary a jsou vhodné k využití v procesu reverzního inženýrství.<sup>2</sup>

Podrobněji se laserovým skenerům věnuje práce v předchozích kapitolách. Využití těchto zařízení především v reverzním inženýrství jsou věnovány následující kapitoly. Příkladem přístroje spadajícího do této kategorie je HandySCAN 700™, který je zobrazen na obrázku 1.11.



**Obrázek 1.11 – HandySCAN 700<sup>TM</sup> 14**

### **1.4.3 Optické skenery**

Optické skenery jsou schopné skenovat velmi rychle a s texturou. Oproti laserovým skenerům nedosahují tak vysoké přesnosti, na druhou stranu však při nižších nárocích na přesnost ušetří čas a urychlí proces kontroly. <sup>2</sup>

Zařízení skenují optickým aparátem předmět z několika úhlů. Objekt je při každém natočení snímán (focen) a data jsou odesílána do počítače. Výsledný tvar povrchu se utváří metodou aproximace poté, co jsou zaznamenány snímky ze všech úhlů. Před započítím skenování jsou na předmětu vyznačeny důležité body, které slouží jako orientační značky pro tvorbu výsledného modelu. K tomuto účelu se používají tzv. centrovací terčíky, které jsou lepeny přímo na povrchu skenované součásti. Jejich počet není nijak omezen. Součástí snímků bodů na povrchu by měla být i kalibrační tyč položená vedle předmětu. <sup>3</sup>



**Obrázek 1.12 – Optický skener Atos Triple Scan ve spojení s robotickým ramenem <sup>15</sup>**

Další možné dělení skenerů: <sup>3</sup>

- destruktivní 3D skenery (schopné digitalizovat vnější i vnitřní objemy),
- ultrazvukové 3D skenery (založené na principu snímání povrchu předmětu ultrazvukovou sondou),
- rentgenové 3D skenery (schopné zjišťovat informace jak o vnější, tak vnitřní geometrii užitím rentgenového záření).

Dělení dle mobility: <sup>3</sup>

- stacionární systémy (skenovaný objekt je nutno přepravit k zařízení),
- mobilní skenery (zařízení lze přenášet a pohybovat ve volném prostoru).

## **2 Měření, úprava dat a technologie výroby prototypu**

Měření sofistikovaných povrchů předmětů, které se dají vytvářet na 3D tiskárně je obtížné. Lze ho provádět pouze několika metodami, přičemž se jednotlivé metody od sebe liší například v dosažené přesnosti měření nebo počtem změřených prostorových bodů na povrchu vytištěného 3D objektu. K tzv. reverznímu inženýrství prostorové součásti se využívá, jako jedna z existujících technologií, 3D laserové skenování. Laserový skener HandySCAN 700<sup>TM</sup>, který byl využit k získání prostorové geometrie a ověření rozměrů, je podrobněji popsán v následujících kapitolách. K úpravě a sloučení nescanovaných dat byl použit software Geomagic Control X.

### **2.1 3D tisk**

Aditivní technologie - 3D tisk je proces přeměny digitálního designu v 3D předměty. Je vhodnou a cenově dostupnou cestou výroby prototypů a finálních produktů, populární ve sféře podnikání, mezi vynálezci a dalších odvětvích.

Jednou z technologií, které dnešní tiskárny využívají, je SLS. Během tohoto procesu jsou malé částčky plastů, keramiky nebo skla spojovány dohromady teplem z vysoce výkonného laseru a formovány do prostorového objektu.<sup>18</sup>

#### **2.1.1 Technologie SLS**

SLS (selektivní laserové spékání) je jedna z nejrozvinutějších a plošně používaných technologií 3D tisku. Proces laserového spékání umožňuje komplexním 3D objektům, aby byly vystavěny selektivním tavením práškového materiálu v po sobě jdoucích vrstvách. Široký rozsah druhů materiálů je jednou z hlavních výhod SLS technologie, protože jakýkoliv materiál, který může být po zahřátí lepen, lze v procesu SLS aplikovat. V praktických aplikacích jsou však práškové materiály, které mohou být úspěšně používány, nepočetné. Hlavním důvodem takto omezeného množství materiálů je, že SLS vyžaduje vysoko-výkonné práškové materiály. Například, za účelem vytvoření tvarovaných součástí s dobrou rozměrovou přesností a mechanickou pevností, by měl pryskyřicový materiál používaný k přípravě prášku mít odpovídající bod tání, vysokou termální stabilitu, malý

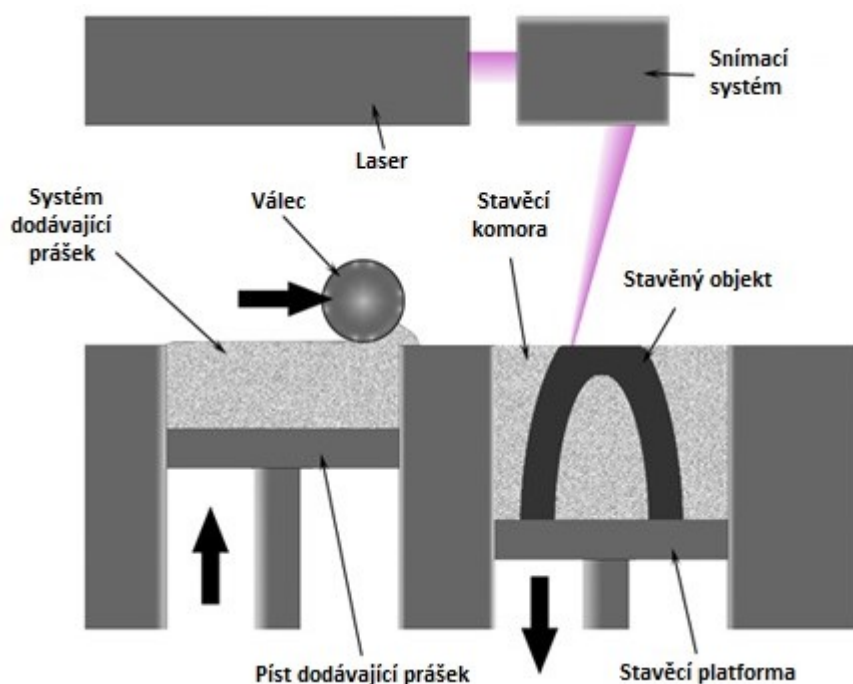


poměr smrštění a vyhovující viskozitu taveniny. Dalším parametrem připraveného práškového materiálu je podoba jednotlivých zrn, která by měla mít přibližně sférický tvar s průměrem 20-80  $\mu\text{m}$  zabezpečující lepší tekutost prášku a vyšší objemovou hustotu.<sup>17</sup>

Jako u všech ostatních metod 3D tisku začíná později tištěná součást nejprve jako CAD soubor. Takovýto model je konvertován do formátu .STL, který je schopna 3D tiskárna zpracovat.

Předměty tištěné technologií SLS jsou vyrobeny z práškových materiálů, nejčastěji plastů, jako například nylon nebo různé druhy polyamidů, které jsou rozptýleny do tenké vrstvy na povrchu stavěcí platformy uvnitř stavěcí komory. Laser, který je kontrolován pomocí počítače, pulsuje dolů na platformu a vytváří průřez objektem do prášku a zahřívá ho těsně pod bod varu materiálu (spékání) nebo nad bod varu (tavení), výsledkem čehož je spojení částic prášku dohromady do pevné formy. Jakmile je zformována počáteční vrstva, platforma popojede (obvykle vzdálenost menší než 0,1 mm) a je položena další vrstva prášku, do které laser spéká nový průřez. Tento proces je opakován do doby, než je celé tělo součásti vytištěno.

Při tisku je ve stavební komoře teplota přibližně 170 °C a součásti se roztahují v ose Z o zhruba 1,075 % své délky. V momentě, kdy je objekt kompletní po dokončení tisku, bývá ponechán uvnitř stavěcí komory k řízenému ochlazování, které může probíhat 12 až 20 hodin v závislosti na velikosti stavby (výšky stavby), z důvodu smrštění součásti do velikosti odpovídající modelu.<sup>18</sup>



Obrázek 2.1 – Schéma technologického procesu SLS<sup>18</sup>



Výhodou SLS technologie oproti jiným druhům 3D tisku jako například FDM je, že tištěná konstrukce nepotřebuje žádné opěry k zajištění stability celého výtisku. Díky tomu není třeba přidavných konstrukcí v případě tisku oblastí převislých od základního těla součásti. Celá stavební komora je postupně zaplňována práškovým materiálem a samotný prášek slouží jako opěrné médium modelu a zaplňuje celý prostor komory, čímž zajišťuje stabilitu součásti během tisku, ale i při následném tepelném zpracování, kdy je vytištěný předmět řízeně ochlazován a až poté vyjmut z prášku a tiskárny.<sup>18</sup>

Zmíněná metoda FDM naopak musí využívat nosné podpory u určitých tvarů součástí, aby nedošlo ke zborcení modelu v průběhu tisku nebo se výtisk nezkroutil. S nosníky souvisí i spotřeba materiálu, která bývá větší než u technologie SLS. Podpory sice obsahují jen zlomek objemu materiálu z celkového použitého množství, avšak zvyšují strojní čas a celkové náklady. Po vytištění součásti musí být mechanicky odstraněny a vytištěný předmět se musí opracovat a zkontrolovat.<sup>20</sup>

Takovéto nosné konstrukce ukazuje obrázek 2.2, kde lze vidět, v jakých místech je potřeba použít podpor k zajištění stability a tvaru tištěné součásti. Bez podstav by nebylo možné předmět FDM technologií vytisknout. Tvar písmene T na obrázku v levé části byl vytištěn bez podpěrné konstrukce, což způsobilo deformaci, naopak v pravé části obrázku je výtisk s podpěrami.



**Obrázek 2.2 – Porovnání objektu vytištěného bez podpěr a s podpěrami technologií FDM<sup>20</sup>**

### 2.1.2 Zařízení EOS P396

Součást měřená laserovým 3D skenovacím zařízením v dalších kapitolách práce, byla vytištěna na profesionální 3D tiskárně EOS P396, která patří k poslední generaci 3D SLS tiskáren. Tuto skutečnost prokazuje přesnost a kvalita vytištěných dílů. Tiskárna samotná je vyobrazena na následujícím obrázku 2.3 a její technické parametry uvedeny v tabulce 1.



Obrázek 2.3 – 3D tiskárna EOS P396 <sup>19</sup>

Tabulka 1 – Vybrané technické parametry zařízení EOS P396 <sup>19</sup>

Maximální rozměry tisknuté součásti (X * Y * Z)	340 * 340 * 620	mm
Rychlost výroby (do výšky)	22	mm·hod <sup>-1</sup>
Rychlost snímání	Až 2000	mm·s <sup>-1</sup>
Rychlost polohování	3000	mm·s <sup>-1</sup>
Tloušťka vrstvy	60-120	μm
Výkon laseru	80	W

## 2.2 HandySCAN 700™

Skenovací zařízení HandySCAN je dodáván současně s programem VXelements, který zajišťuje přenos dat mezi skenerem a počítačem. Software zároveň přepočítává nasnímaná data a generuje výsledné tělo objektu.

Program disponuje základními nástroji pro úpravu nasnímaných dat jako: decimace polygonové sítě, vyhlazení hranic, záplatování děr, odstranění šumu a další možnosti. Software také umožňuje na naskenovaných datech vytvářet geometrické prvky, které lze následně přenášet do CAD systému.<sup>16</sup>

Další výhody programu jsou:<sup>16</sup>

- kvalitnější povrch, který nemusí být dále upravován, zajišťuje algoritmus povrchové optimalizace. Program také zaručuje, že na datech nevznikají místa s překrývajícími se plochami.,
- výstupem ze skenování jsou data, která mohou být exportována ve standardních formátech (stl, obj, wrl, atd.),
- v průběhu nebo po skenování lze změnit nastavení rozlišení nasnímaných dat,
- program vykresluje skenovaný předmět v reálném čase a umožňuje tak obsluhu vědět, která místa jsou již naskenována a která ne.

K širokému spektru využití skeneru HandySCAN v oblasti reverzního inženýrství (návrh, design a analýza) a dalších patří:<sup>16</sup>

- 3D skenování do CAD softwaru,
- úprava návrhu designu,
- podklady pro CAD úpravy modelů,
- návrh a design vozidel, konečný a tvářecí design,
- digitální modely a makety, digitalizace hliněných modelů,
- rapid prototyping / 3D tisk,
- analýza metodou konečných prvků,
- údržba, opravy a repasování dílů,
- kontrola odlitků, výstupních dílů, prvního kusu výroby,
- ochrana, obnova a digitální archivace,
- 3D skenování pro výzkum a publikování,
- virtuální a rozšířená realita, počítačová grafiky, speciální efekty.

**Tabulka 2 – Technické parametry skeneru HandySCAN 700™ 16**

	HandySCAN 700™
Váha	0,85 kg
Rozměry	122 x 77 x 294 mm
Rychlost měření	480000 měření·s <sup>-1</sup>
Oblast skenování	275 x 250 mm
Zdroj světla	7 laserových křížů (+1 extra linie)
Třída laseru	II (bezpečný pro zrak)
Rozlišení	0.050 mm
Přesnost	až do 0.030 mm
Objemová přesnost	0.020 mm + 0.060 mm·m <sup>-1</sup>
Objemová přesnost (s MaxSHOT 3D)	0.020 mm + 0.025 mm·m <sup>-1</sup>
Vzdálenost skeneru od objektu	300 mm
Hloubka ostrosti	250 mm
Velikost skenovaného objektu (doporučená)	0.1–4 m
Software	VXelements
Výstupní formáty	.dae, .fbx, .ma, .obj, .ply, .stl, .txt, .wrl, .x3d, .x3dz, .zpr
Kompatibilní software	3D Systémy (Geomagic® Solutions), InnovMetric Software (PolyWorks), Dassault (CATIA V5 a SolidWorks), PTC (Pro/ENGINEER), Siemens (NX a Solid Edge), Autodesk (Inventor, Alias, 3ds Max, Maya, Softimage)
Připojení k PC	1 X USB 3.0
Provozní okolní teplota	15–40 °C
Provozní okolní vlhkost (bez kondenzace)	10–90 %

### 3 Reverzní inženýrství prototypu

Předmětem, který sloužil jako prototyp ke 3D skenování a porovnání skenu s CAD modelem, byla Ironmanova přilba – jedna její část, vytištěná ze tří hlavních celků na 3D tiskárně EOS P396. Přilba bude po dokončení sloužit jako propagační předmět laboratoře ProtoLab pro veletrhy a výstavy k demonstraci možností tisku velkých skořepinových dílů na 3D tiskárně. Po sestavení a slepení předních dílů přilby, která se skládá ze dvou bloků – čela a obličeje, bude helma nalakována a vypolstrována, tak aby se dala nosit. Přední část přilby bude možno otevřít.

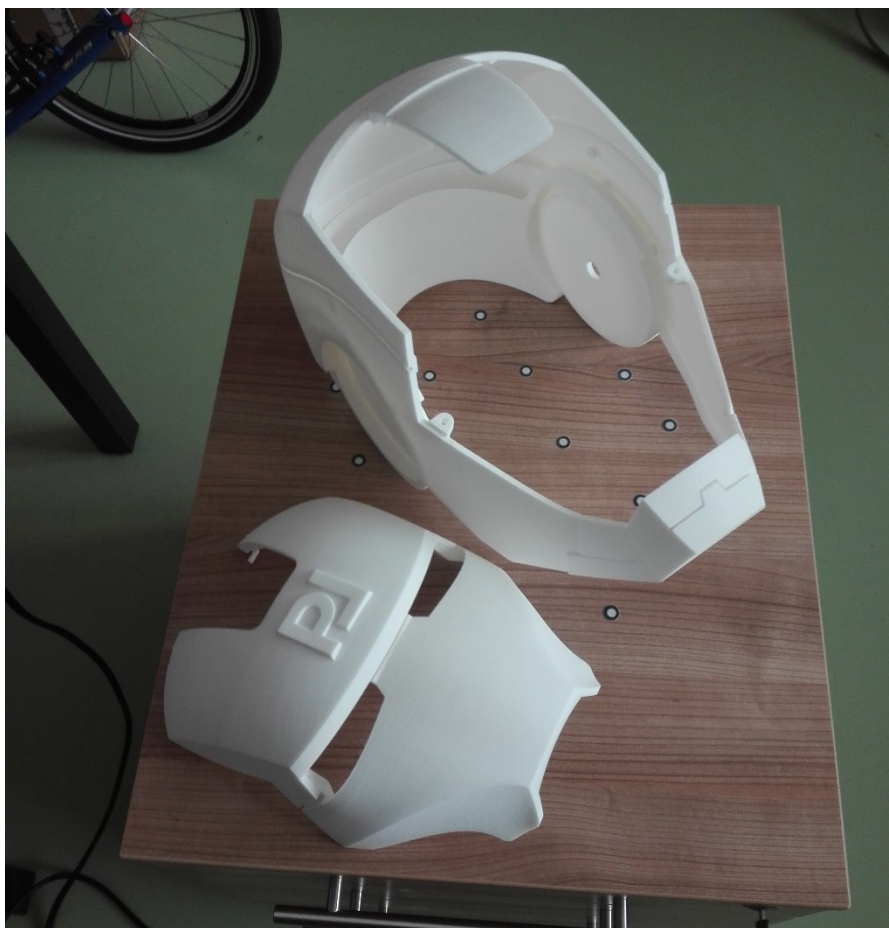
Na obrázku 3.1 jsou vytištěné jednotlivé části přilby rozestavené vedle sebe.



**Obrázek 3.1 – Rozložené části přilby**

Následující obrázek 3.2 obsahuje výklopnou přední část helmy sestavenou z čelního a obličejového dílu, postavenou vedle hlavního těla. Před slepením čela a obličejové oblasti budou oční mezery vyplněny polopropustným materiálem, aby byla možná orientace i při sklopeném hledí přilby. Další obrázek 3.3 zobrazuje přilbu složenou ze všech komponent, které k přilbě patří – tedy finální vzhled.



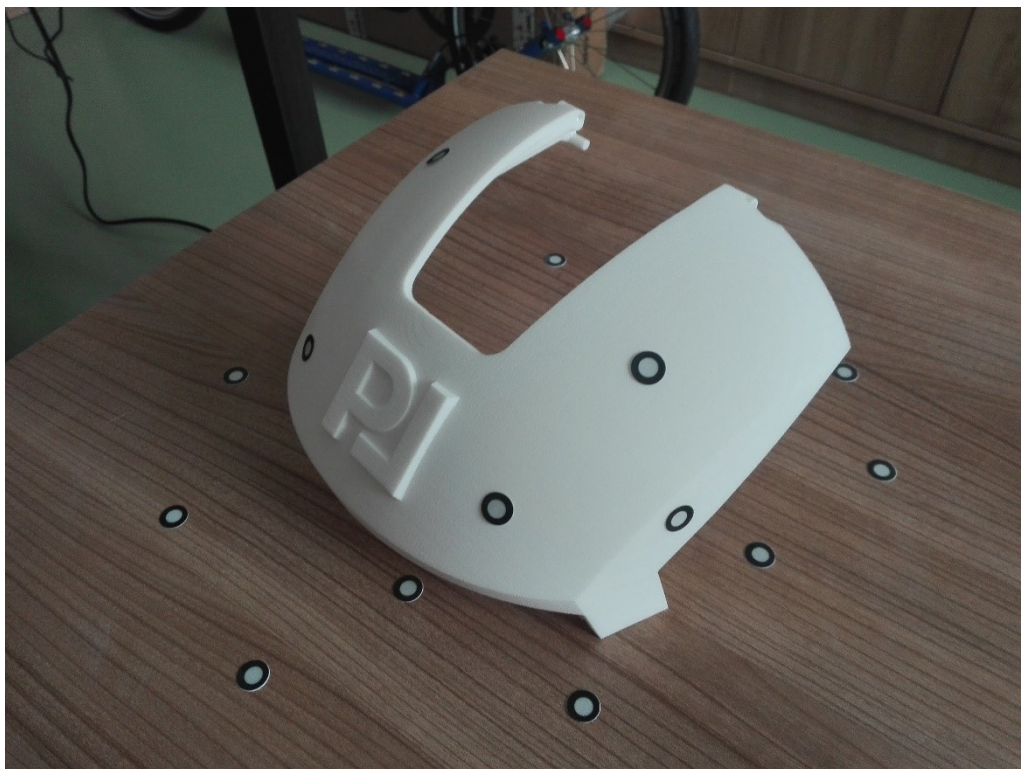


**Obrázek 3.2 – Výklopná přední část přilby mimo hlavní celek**



**Obrázek 3.3 – Komplexní vzhled přilby**

Skenovanou částí přilby bylo čelo, jehož upravený a zpracovaný sken byl porovnáván s modelem zhotoveným v CAD softwaru. Čelo přilby s nalepenými reflexními značkami ustavené na stolku a připravené na skenování je na obrázku 3.4.



**Obrázek 3.4 – Čelo přilby**



**Obrázek 3.5 – Pracovitě skenování se skenerem připojeným k PC a kalibrační deskou**



Před každým skenováním je doporučeno provést kalibraci skeneru k zajištění přesného měření. Kalibrace se provádí nad skleněnou kalibrační deskou umístěnou ve dřevěném obalu (na obrázku 3.7), která zaručuje správné nastavení snímání bodů skenerem. Deska na obrázku 3.6 je spárovaná přímo se skenerem a po určitém období (přibližně dva roky) bývá nezbytné ji zaslat výrobci na kontrolu, případnou opravu.

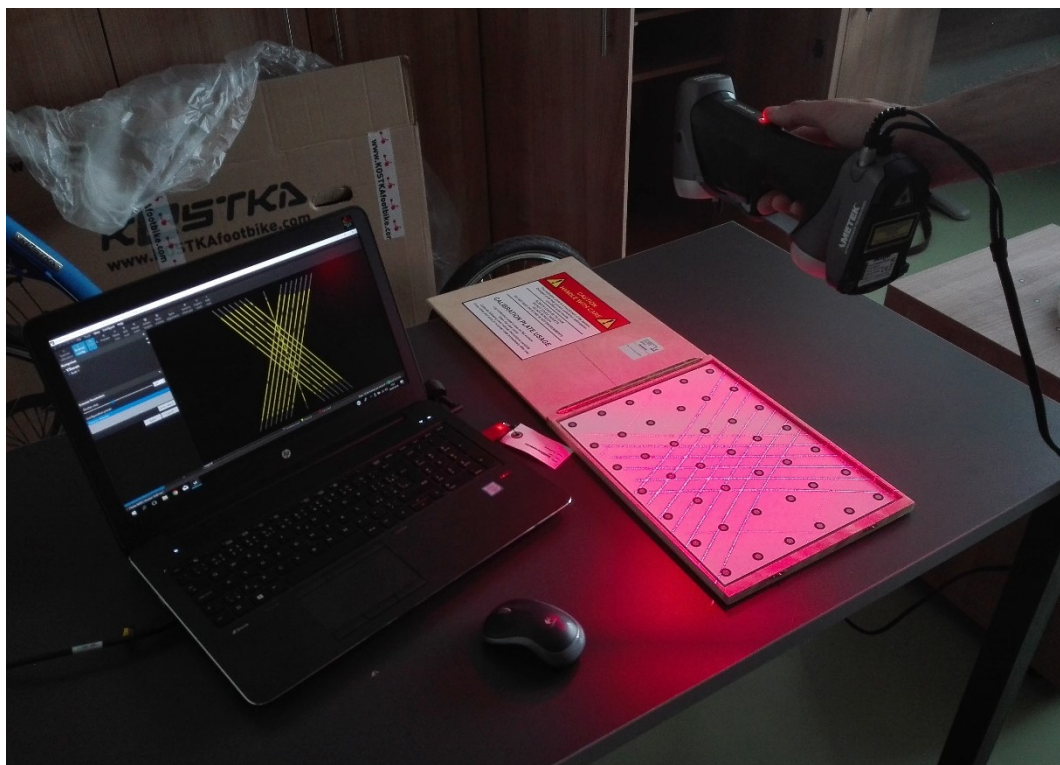


**Obrázek 3.6 – Kalibrační deska**

V rámci kalibrace je uskutečněna i kalibrace snímání. Jedná se o konfiguraci síly laseru. Každá plocha má jiné barevné a světelné vlastnosti, a proto je důležité upravit nastavení parametrů pro získání optimálních obrazů laserových čar. Pokud je laser podexponovaný, zachytáván kamerami pouze slabě nebo vůbec, nemá skener dostatečné informace k výpočtu fyzického povrchu a budování sítě bodů. Naopak když je laser příliš intenzivní, zaslepuje kamery a není jasně definovatelný. Tato situace může vést k nesprávné rekonstrukci povrchu nebo neobvyklému šumu v získávaných datech. Kalibrace sytosti paprsku laseru je zachycena na obrázku 3.7.

Po kalibraci skeneru jsou na model nalepeny referenční terčíky – reflexní body, vůči kterým skener vymezuje svoji fyzickou polohu v prostoru. Body se umísťují přímo na skenovaný předmět ve vzdálenosti minimálně 20 mm od sebe nebo do blízkého okolí kolem objektu na desku ve vzájemné vzdálenosti minimálně 100 mm. Během skenování potřebuje mít zařízení neustále 3–4 referenční body v zorném poli.



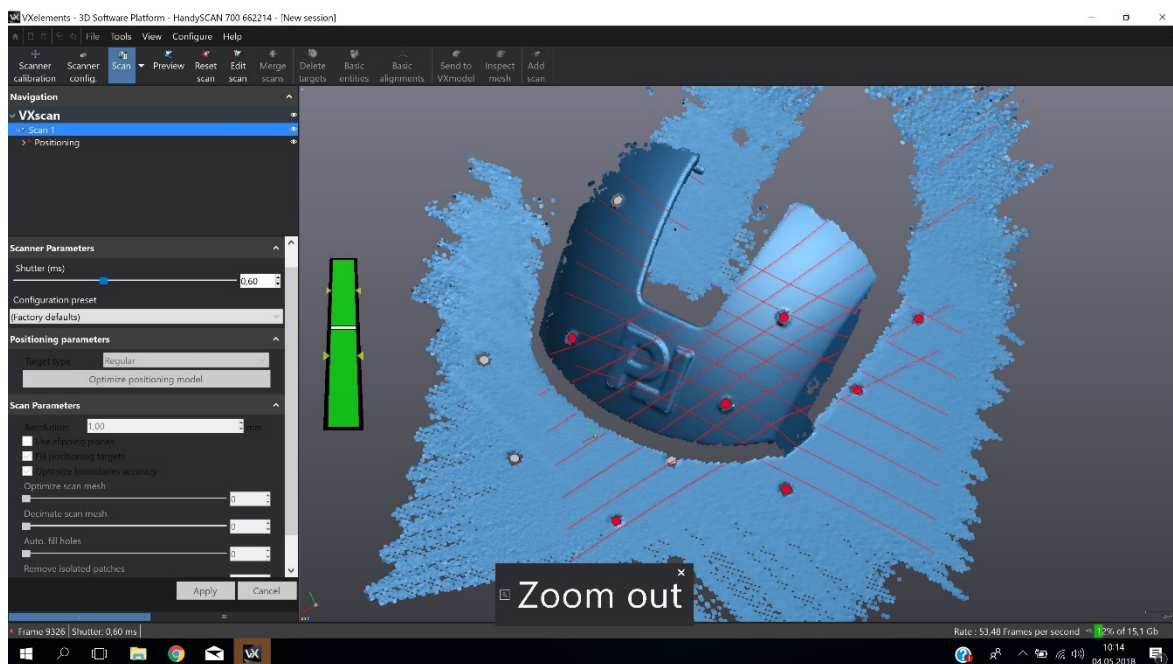


**Obrázek 3.7 – Skener v poloze nad kalibrační deskou při kalibraci**

Následující obrázek 3.8 ukazuje vlastní průběh skenování prototypu. Skener postupně snímá povrch objektu a software VXElements vykresluje nasnímaná data v reálném čase v prostředí programu.



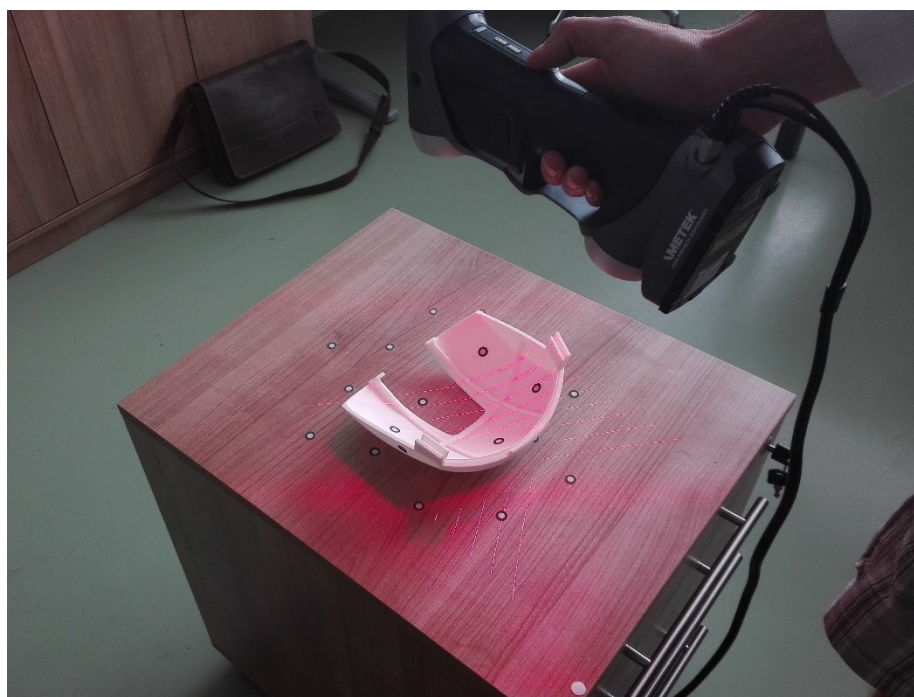
**Obrázek 3.8 - Skenování**



**Obrázek 3.9 – V reálném čase vykreslovaná data v prostředí VXelements**

Pro práci s modelem v softwaru je možno upravit rozlišení bodů, čímž dojde k vyhlazení hran nasnímaných dat, větší rozlišení bodů však více zatěžuje hardware počítače a znesnadňuje další práci se skenem. Přesnost skenování zůstává stejná při libovolném rozlišení, kdy se pouze mění vizuální vzhled modelu na obrazovce počítače.

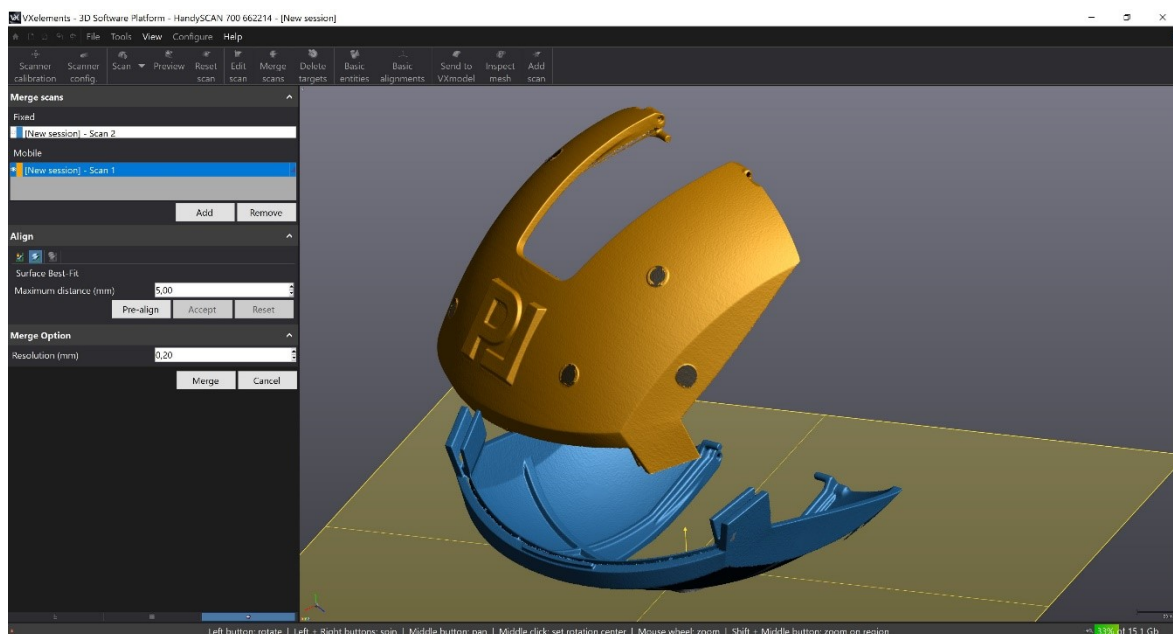
Jakmile je součást dostatečně naskenována z jedné strany, otočí se na stranu druhou a provádí se další sken.



**Obrázek 3.10 – Skenování součásti z druhé strany**

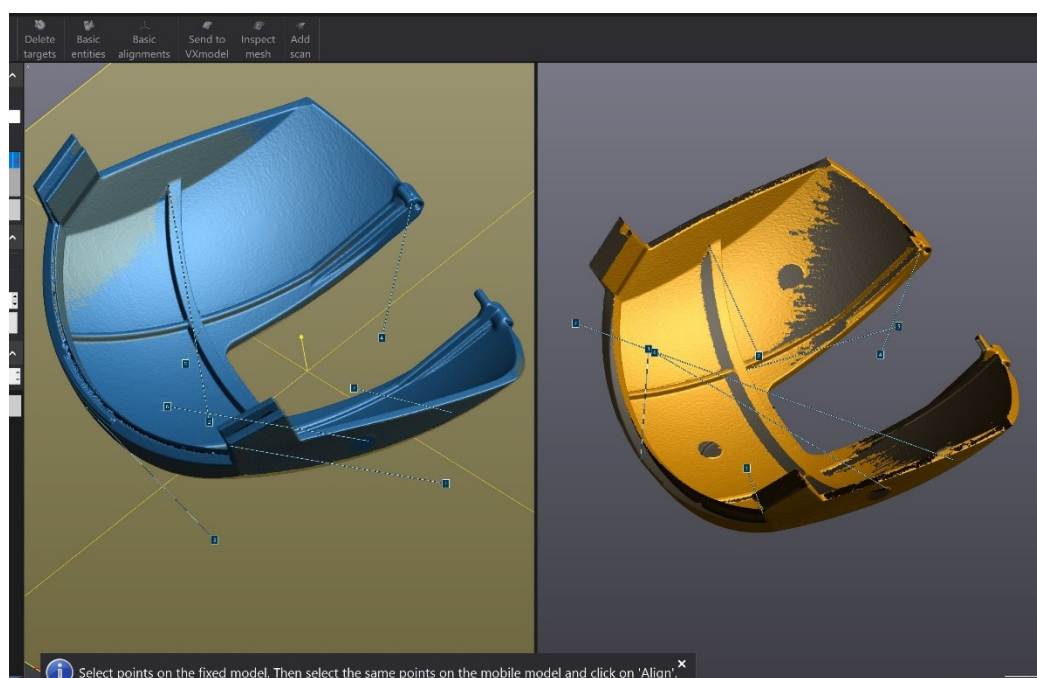


Po naskenování z obou stran, jsou skeny zpracovány a u obou odstraněny přebytečné ořezové roviny (nasmímaná deska, na níž součást ležela) a software vytvoří modely, které jsou oba zároveň nahrány do prostředí programu VxElements, kde se dají sloučit v jeden celek.



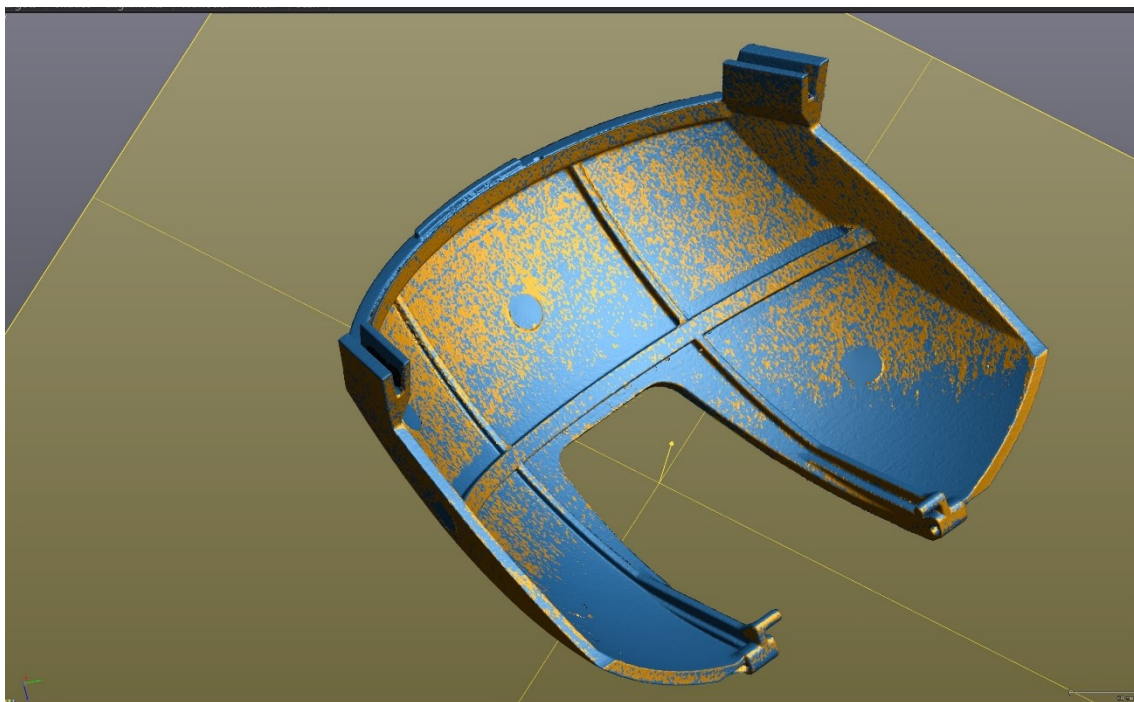
**Obrázek 3.11 – Skeny z různých směrů připravené k dalším úpravám**

Program za pomoci referenčních bodů, které nadefinuje na obou částech obsluha počítače, předběžně zarovná oba skeny do podobné polohy, tak jak je zobrazeno na obrázku 3.12. K určení poměrně přesné vzájemné polohy stačí přibližně 7 bodů povrchu.



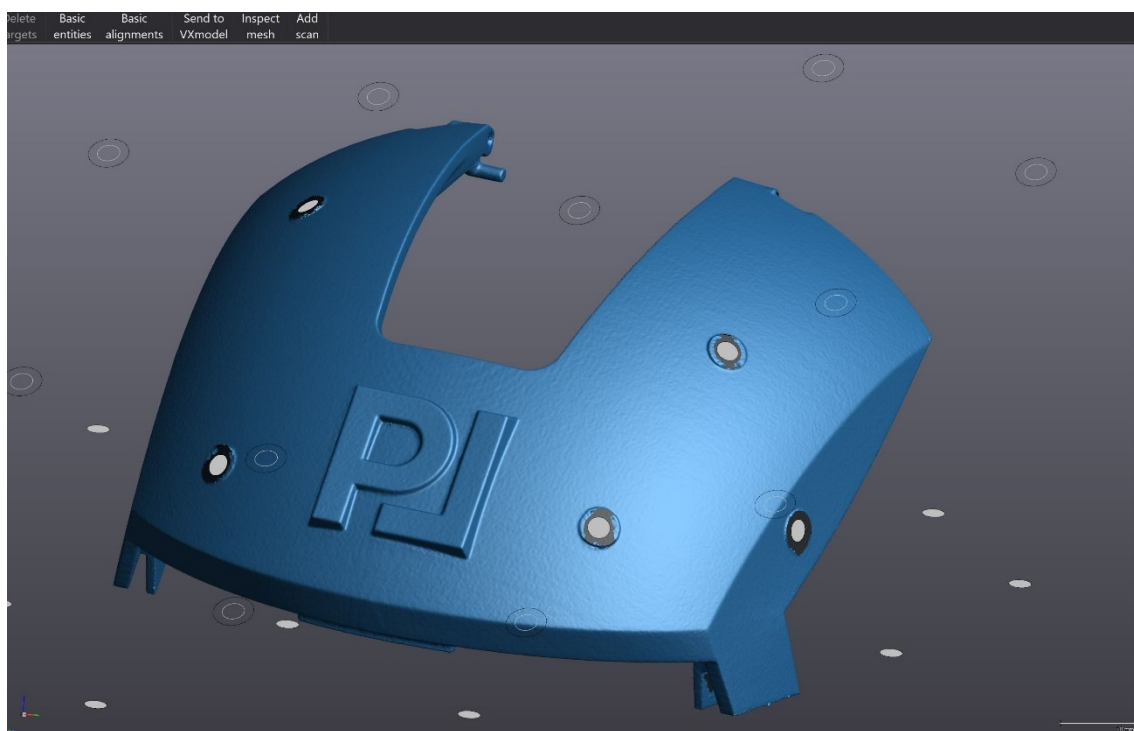
**Obrázek 3.12 – Nadefinované referenční body potřebné k zarovnání**

Samotné zarovnání provede program na základě společných ploch a spojí oba skeny v jeden.

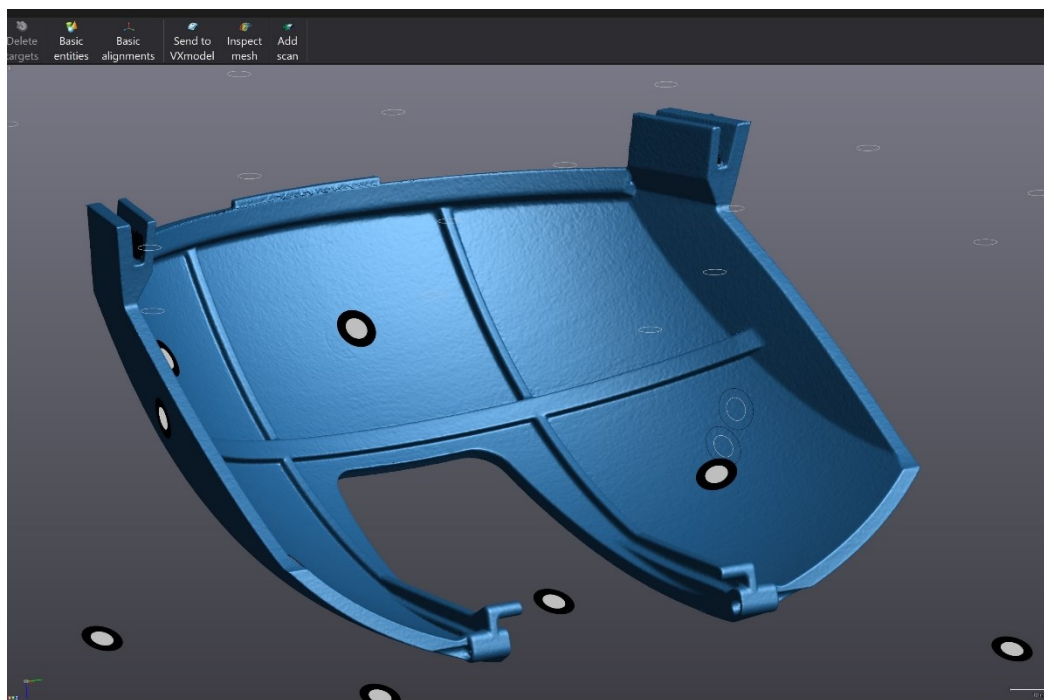


**Obrázek 3.13 – Zarovnané a sloučené skeny**

Finálním produktem je nasnímaný model, který slouží k porovnání s CAD modelem. Poslední možnou úpravou je zarovnání a orientace modelu v prostoru pro lepší navazující práci, tento krok ale není vždy potřebný.



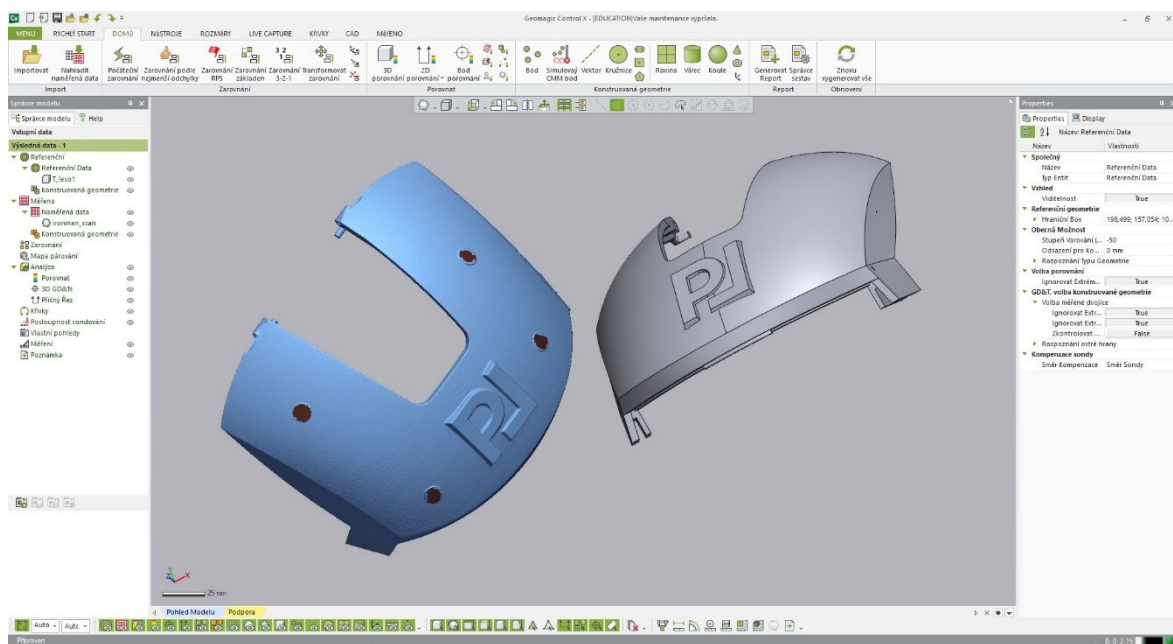
**Obrázek 3.14 – Výsledný model získaný 3D skenováním přední strana**



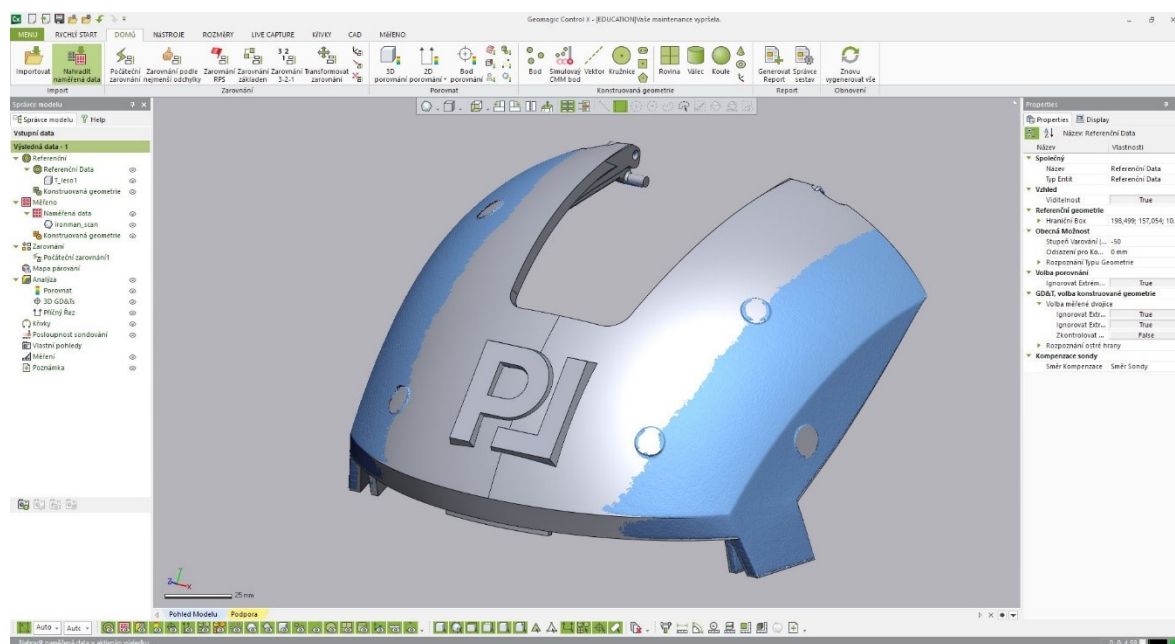
Obrázek 3.15 - Výsledný model získaný 3D skenováním zadní strana

#### 4 Porovnání naměřeného prototypu s CAD daty

Model získaný 3D skenováním a úpravou v prostředí programu VxElements byl exportován do softwaru Geomagic Control X. Současně byl nahrán i CAD model, který sloužil jako předloha ke 3D tisku a nachází se v pravé části obrázku 4.1.

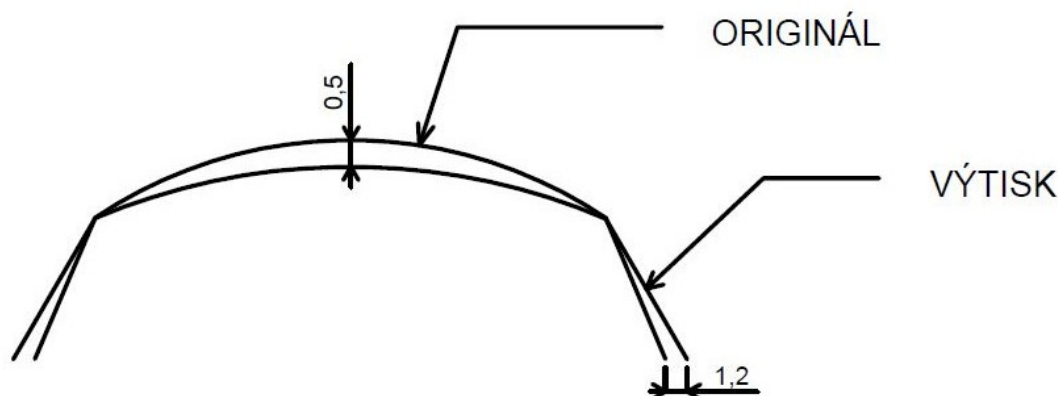


Obrázek 4.1 – Naskenovaný model a CAD model v programu Geomagic



**Obrázek 4.2 – Sloučené modely**

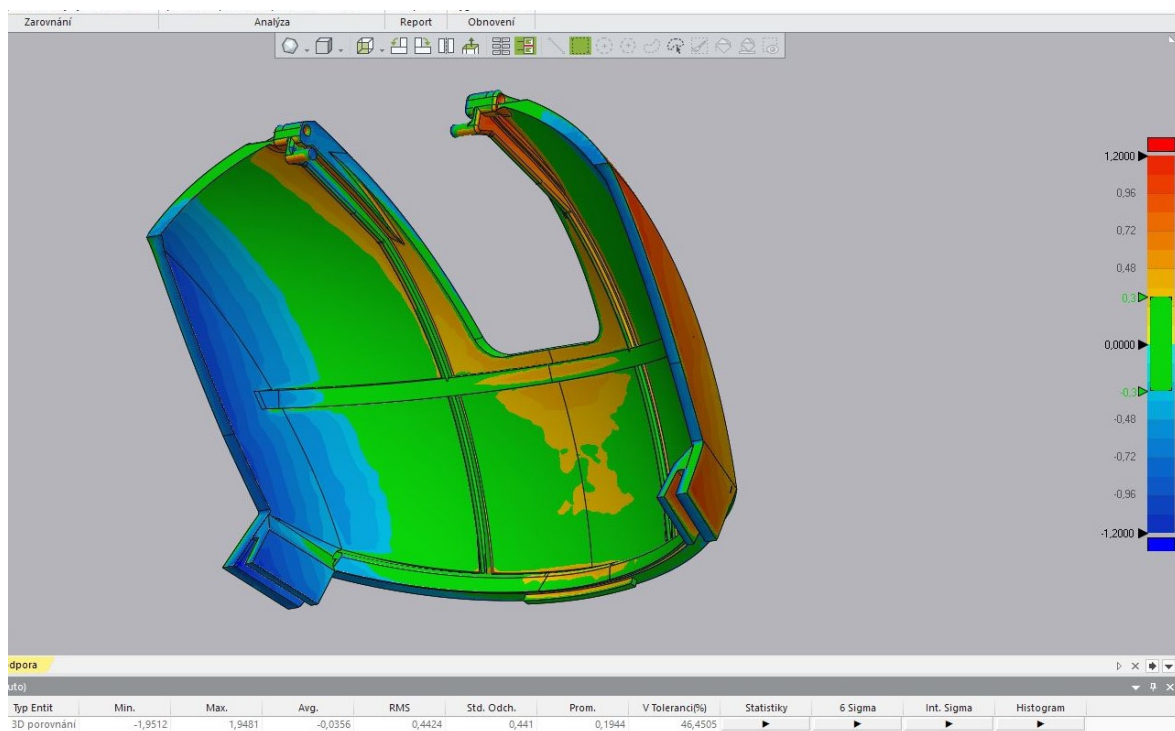
V programu byla použita funkce k zvýraznění místních odchylek prototypu od původního CAD modelu. Software vykreslil barevnou škálu s rozmezím tolerance odchylky rozměrů, podle které bylo určeno, v jakém místě je jak velká odchylka od původního rozměru. Na základě barevného rozlišení bylo zjištěno, že prototyp vytisknutý na 3D tiskárně je v celém svém objemu zploštělý a má odchýplé krajní oblasti. Zjednodušené schéma deformace výtisku je uvedeno na obrázku 4.3.



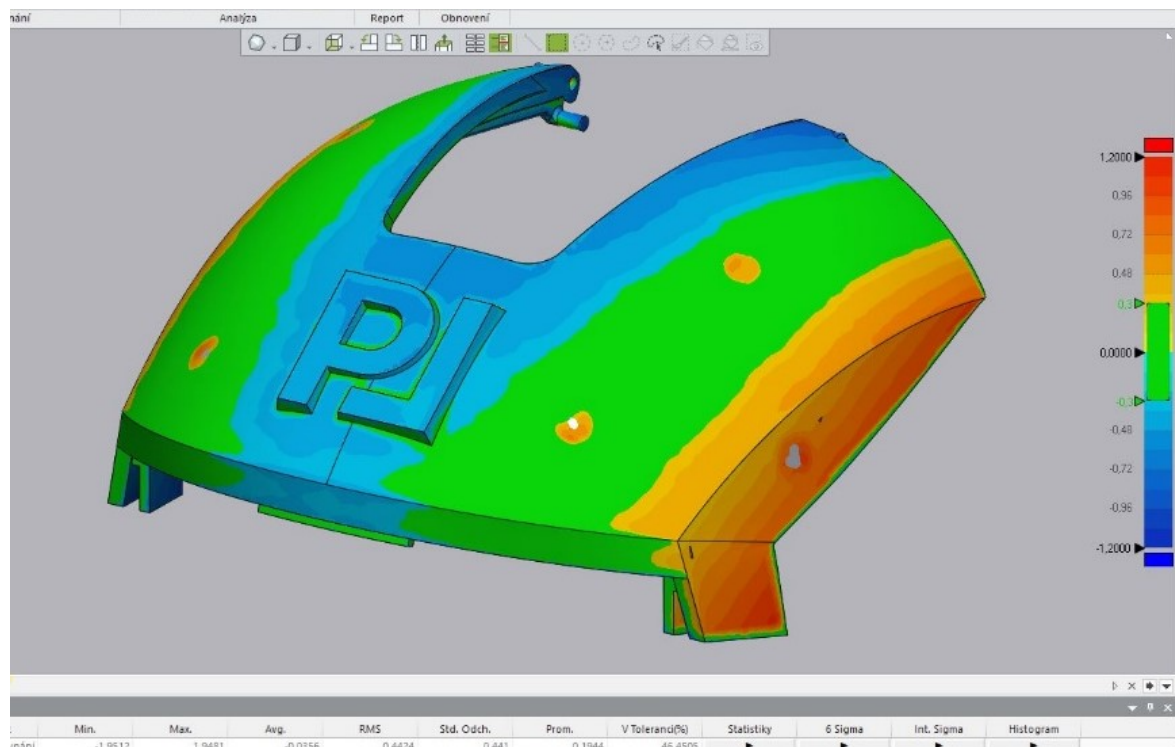
**Obrázek 4.3 Schéma deformace prototypu**

Na obrázcích 4.5 a 4.6 je uvedeno barevné vyznačení odchylek jak ze zadní, tak z přední strany. Zadaná tolerance byla tři desetiny milimetru. Vytisknutý model se tedy do stanoveného tolerančního rozmezí nevešel. V nejproblematictějších oblastech dosahovala odchylka od původního modelu velikosti až 1,2 milimetru. Zploštělá oblast čela měla hodnotu největší odchylky přibližně 0,5 milimetru.





**Obrázek 4.4 – Vyhodnocení odchylky rozměrů od základního CAD modelu (zadní strana)**



**Obrázek 4.5 – Vyhodnocení odchylky rozměrů od základního CAD modelu (přední strana)**

## **Zhodnocení, závěr**

3D tiskárny slouží k výrobě součástí a dílů, které by žádnou jinou výrobní technologií nemohly být vyrobeny nebo by jejich výroba byla velmi složitá, či nákladná. Další možností, kdy může 3D tisk vhodně posloužit, je rekonstrukce objektu, ke kterému neexistuje počítačový CAD model a tvar součásti je získáván za pomoci například 3D laserového skenování. Na skenování navazuje modelování v CAD softwaru, kdy je model za pomoci nástrojů programu (tažení po křivce, vysunutí, rotace) tvarován a na konci tohoto řetězce se nachází 3D tisk. Zmíněný řetězec se nazývá reverzní inženýrství.

Hlavním tématem této bakalářské práce byla zpětná kontrola prototypu získaného 3D tiskem. V tomto případě byl vytištěný objekt na 3D tiskárně skenován, ale nebylo potřeba tvořit v CAD softwaru model, jelikož byl již hotový a už dříve sloužil jako výchozí data pro 3D tisk. Data získaná 3D skenováním byla použita k verifikaci rozměrů vytištěného prototypu.

Velké skořepinové díly mají tendenci se kroutit během řízeného chladnutí ve stavební komoře. Tato skutečnost je způsobena několika vlivy jako například ustavením a orientací výtisku ve stavební komoře, rozdílnou tloušťkou stěny v odlišných místech tištěného prototypu nebo rychlejším odvodem tepla v místech, kde je průřez skořepiny slabší oproti průřezu širšímu. Tyto, ale i další vlivy způsobují v materiálu pnutí, které zapříčinilo deformaci prototypu.

Zmíněné faktory způsobily, že u kontrolovaného prototypu došlo k deformaci tvaru součásti. Díl byl oproti svému vzorovému CAD modelu zploštělý a krajní oblasti, které slouží ke spasování a slepení s druhým dílem obličejové oblasti přilby, se vzdálily od své původní polohy v nejkritičtějších místě o 1,2 milimetru. Zploštění čelní oblasti bylo v největší míře o 0,5 milimetru oproti modelu. Celý prototyp se tedy během chladnutí ve stavební komoře prohnul. 3D skenováním bylo zjištěno, že vytištěný model nesplňuje zadanou toleranci rozměrů.

Možným řešením tohoto problému je jiné ustavení prototypu ve stavební komoře 3D tiskárny. V komoře se nachází velké množství práškového materiálu (až 40 kilogramů), který ovlivňuje tištěné díly. Během řízeného ochlazování, kdy se výtisk smršťuje zpět na požadovaný rozměr, je ze stavební komory řízeně odváděno teplo, což může způsobovat právě prohýbání a deformace chladnoucích skořepinových dílů. I vlastní hmotnost prášku dokáže ovlivnit průhyb součásti v případě nevhodného ustavení na dně komory, kdy je vytištěný díl ohřátý a nemá pevnostní vlastnosti, které získá teprve až po zchlazení a vyjmutí z prášku.



Dalším potenciálním východiskem zamezení zkroucení skořepiny mimo toleranční pole je úprava CAD modelu na základě známé velikosti deformace tak, aby se díl po zchladnutí zdeformoval do správných rozměrů. Toto řešení je časově náročnější, komplikované na přepočty a konstrukci vlastního modelu, který by 3D tiskárna tiskla a není zaručen výsledek, že se prototyp při chladnutí zkroucí do správné velikosti a rozměrů. Z toho plyne, že nejjednodušší možností, jak zajistit co možná nejvyšší přesnost vytištěné skořepiny, je zaměřit se na vlastní ustavení ve stavební komoře 3D tiskárny. Jedná se o orientaci dílu, polohu v komoře, skutečnost, že je skořepina tištěna samostatně nebo s dalšími díly a ostatní faktory, které mohou ovlivnit výsledný tvar tenkostěnného objektu.

## **Poděkování**

Rád bych zde poděkoval především svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Marku Pagáčovi, Ph.D. za pomoc, cenné rady a konzultace. Dále mé velké díky patří i panu Ing. Lukáši Jančarovi, zejména za vstřícné jednání, ochotu při poskytnutí materiálů a odbornou pomoc během skenování v laboratoři.

Děkuji i své rodině za trvalou, nejen morální, podporu během celého studia a psaní této bakalářské práce.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] SOLIDVISION, *3D skenování* [online]. 2018. [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/3d-skenovani/>
- [2] 3D SCAN, *3D skenování* [online]. 2018. [cit. 2018-01-16]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz/3d-skenovani/>
- [3] MM, *Digitalizace - její princip a rozdělení* [online]. 2018. [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>
- [4] WIKIWAND, *STL* [online]. 2018. [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: [http://www.wikiwand.com/pl/STL\\_\(format\\_pliku\)](http://www.wikiwand.com/pl/STL_(format_pliku))
- [5] GABOR PAPOTTI, *Laser Reverse Engineering* [online]. 2018. [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: <https://papottigabor.wordpress.com/2012/06/30/reverse-engineering-fan/>
- [6] LASER SCANNING, *NURBS Surface Model* [online]. 2018. [cit. 2018-01-18]. Dostupné z: <http://www.laser-scanning.co.uk/reverse-engineering/nurbs-surface-model>
- [7] LASER SCANNING, *Parametric Model* [online]. 2018. [cit. 2018-01-18]. Dostupné z: <http://www.laser-scanning.co.uk/reverse-engineering/parametric-model>
- [8] 3D SCAN, *3D skenování* [online]. 2018. [cit. 2018-01-18]. Dostupné z: [http://www.3d-skenovani.cz/wp-content/uploads/2017/05/Ukazkovy\\_protokol\\_ControlX.pdf](http://www.3d-skenovani.cz/wp-content/uploads/2017/05/Ukazkovy_protokol_ControlX.pdf)
- [9] TECHMAGAZÍN, *3D skenování* [online]. 2018. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/534>
- [10] MOROVIČ, Ladislav. *Non-contact measurement of free-form surfaces*. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2016. ISBN 978-80-7380-628-6.
- [11] RESEARCHGATE, *3D CAD model generation of mechanical parts using coded-pattern projection and laser triangulation systems* [online]. 2018. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/235263126\\_3D\\_CAD\\_model\\_generation\\_of\\_mechanical\\_parts\\_using\\_coded-pattern\\_projection\\_and\\_laser\\_triangulation\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/235263126_3D_CAD_model_generation_of_mechanical_parts_using_coded-pattern_projection_and_laser_triangulation_systems)
- [12] SlideShare, *Data acquisition methods in reverse engineering* [online]. 2018. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/ranjithreddy718689/data-acquisition-methods-in-reverse-engineering>

- [13] DirectINDUSTRY, *PRODUITS ASSOCIÉS À VOTRE RECHERCHE* [online]. 2018. [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <http://www.directindustry.fr/prod/mitutoyo/product-4906-601467.html>
- [14] TCTmagazine, *Creaform HandySCAN 3D series certified by Airbus* [online]. 2018. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/creaform-handyscan-3d-series-certified-by-airbus/>
- [15] Konstrukter, *Pozvánka: Letní škola optické digitalizace 2016* [online]. 2018. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/2016/08/30/pozvanka-letni-skola-opticke-digitalizace-2016/>
- [16] 3D SCAN, *HANDYSCAN 3D* [online]. 2018. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz/skenery/prenosne-3d-skenery/handyscan-3d/>
- [17] SHUAI CHANG, LIQUN LI, LI LU a Jerry YING HSI FUH. Selective Laser Sintering of Porous Silica Enabled by Carbon Additive. *Materials (1996-1944)* [online]. 2017, **10**(11), 1-11 [cit. 2018-05-01]. DOI: 10.3390/ma10111313.
- [18] LIVESCIENCE, *What is Selective Laser Sintering?* [online]. 2018. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html>
- [19] PROTO LAB, *3d tisk plastů* [online]. 2018. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://protolab.cz/3d-tisk-plastu>
- [20] 3D HUBS, *Supports in 3D Printing: A technology overview* [online]. 2018. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview>